

## 4.6 Neue Erkenntnisse über die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf marine Lebensgemeinschaften

LENNART T. BACH & ULF RIEBESELL

**Neue Erkenntnisse über die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf marine Lebensgemeinschaften:** Das marine Pelagial ist der größte zusammenhängende Ökosystem der Welt. Darin lebt eine enorme Vielfalt an Organismen, die von mikroskopisch kleinem Plankton bis hin zu riesigen Bartenwalen reicht. All diese Organismen interagieren direkt oder indirekt in einem komplex verwobenen Nahrungsnetz. Die Stabilität dieses Nahrungsnetzes wird seit Beginn der Industrialisierung durch menschliche Einflüsse zunehmend auf die Probe gestellt. Einer dieser Einflüsse ist die Ozeanversauerung – die Aufnahme von anthropogenem  $\text{CO}_2$  in den Ozeanen, was über eine chemische Reaktion zur Abnahme des pH Wertes führt. Neueste Studien mit pelagischen Lebensgemeinschaften zeigen, dass die Ozeanversauerung marine Nahrungsnetze und Stoffkreisläufe verändern kann, mit möglicherweise erheblichen Auswirkungen auf für uns Menschen wichtige Dienstleistungen aus dem Meer.

**New insights into the impact of oceanic acidification on marine life communities:** The pelagic realm is the largest interconnected ecosystem on our planet. It is inhabited by an enormous diversity of organisms, ranging from microscopic plankton to huge baleen whales. All these organisms interact either directly or indirectly with each other in a complex food-web. The stability of the food-web is currently challenged by major anthropogenic perturbations. Among these perturbations is ocean acidification – the absorption of anthropogenic  $\text{CO}_2$  which reacts with seawater and causes a profound decline in seawater pH. New studies with natural plankton communities show that ocean acidification can re-structure marine food-webs and modify elemental cycles with possible consequences for ecosystem services on which humans depend.

Der Ozean lässt sich in zwei große Lebensbereiche unterteilen – das Pelagial und das Benthos. Als Benthos bezeichnet man den Lebensraum am Meeresboden. Ein prominentes Beispiel für einen benthischen Lebensraum sind Korallenriffe, die ausführlich im folgenden Kapitel behandelt werden. Dieses Kapitel handelt vom Pelagial, dem Freiwasserlebensraum. Das Pelagial ist Heimat für alle frei schwimmenden oder passiv dahintreibenden Organismen. Als Schwimmer, das »Nekton«, bezeichnet man Organismen, die aktiv gegen Meeresströmungen anschwimmen können. Hierzu gehören beispielsweise Kopffüßler, Fische und Wale. Alle freitreibenden Tiere, Pflanzen und Mikroben, die passiv in den Meeresströmungen mitschweben, werden als Plankton bezeichnet. Das reicht von nanometerkleinen Bakterien bis zu mehrere Meter großen Quallen. Innerhalb des Plankton unterscheidet man zwischen drei großen Gruppen: dem bakteriellen (Bakterio-), pflanzlichen (Phyto-) und tierischen (Zoo-) Plankton.

Die systematische Erforschung des pelagischen Lebensraumes begann Ende des 19. Jahrhunderts im Zuge britischer und preussischer Schiffsexpeditionen. Durch Verbesserungen in der Schiffstechnologie sowie neu entwickelte ozeanografische Geräte intensivierte sich die Forschung im darauffolgenden Jahrhundert. Innerhalb der pelagischen Forschung entstanden und entstehen auch weiterhin immer neue Spezialgebiete, die bestimmte Fragestellungen genauer unter die Lupe nehmen. Heute haben wir in groben Zügen verstanden, wie pelagische Lebensräume strukturiert sind. Wir sind jedoch noch weit davon entfernt, die hoch komplexen

Verknüpfungen des pelagischen Nahrungsnetzes in mathematischen Modellen simulieren zu können.

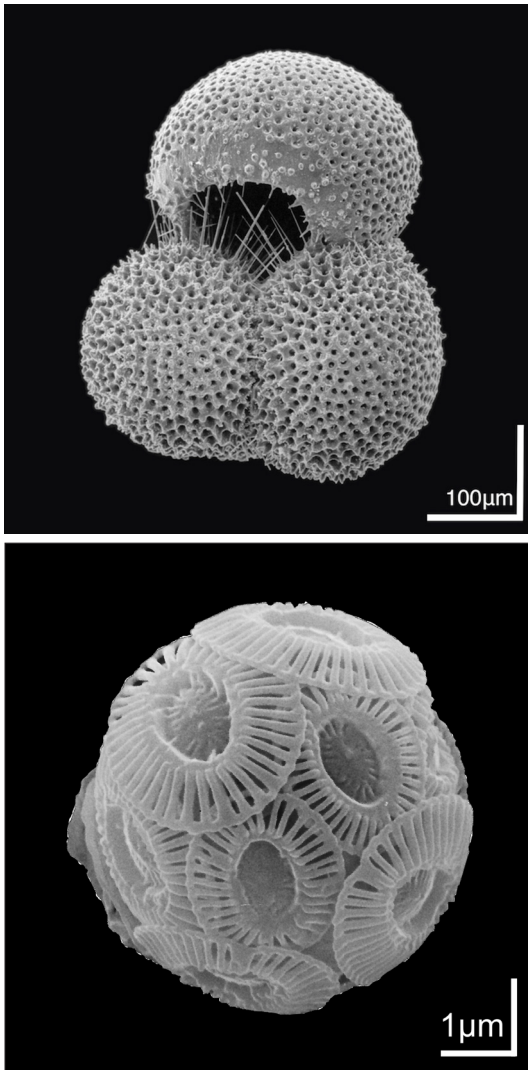
Ende des 20. Jahrhunderts wurde die Menschheit zunehmend auf mögliche Folgen der Klimaerwärmung aufmerksam, die hauptsächlich durch den Ausstoß von anthropogenem  $\text{CO}_2$  verursacht wird. Im Jahr 1990 wurde dazu der erste IPCC-Report veröffentlicht. Sieben Jahre später beschloss die Weltgemeinschaft die Reduzierung des Ausstoßes von  $\text{CO}_2$  im Kyoto-Protokoll von 1997. Ungefähr in diesem Zeitraum erkannten Wissenschaftler das »andere  $\text{CO}_2$ -Problem«, eine Folge der massiven Absorption von menschengemachtem  $\text{CO}_2$  in den Ozeanen. Weil  $\text{CO}_2$  mit Wasser reagiert, entsteht Kohlensäure, die wiederum zerfällt und dabei den pH-Wert des Wassers verringert (Box 1; ZEEBE & WOLF-GLADROW 2001). Meereschemiker hatten diesen Prozess schon lange zuvor beschrieben, aber die möglichen Folgen der »Ozeanversauerung« auf das Leben im Meer waren bis dahin weder erkannt, noch erforscht.

Um die Jahrtausendwende wurden die ersten Studien zur Auswirkung der Ozeanversauerung auf pelagische Organismen veröffentlicht. Im Fokus standen damals insbesondere die im Meer so wichtigen kalkbildenden Plankter wie beispielsweise Coccolithophoriden und Foraminiferen (Abb. 4.6-1), da man davon ausging, dass Kalkbildung durch die sich verringemde Karbonationenkonzentration im besonderen Maße von Ozeanversauerung betroffen sein könnte (Box 1). Die frühen Ergebnisse waren in der Tat alarmierend, denn sie deuteten an, dass es Kalkbildner in Zukunft sehr viel schwerer haben könnten, ihre Schale zu bilden (RIEBESELL et al. 2000, GATTUSO et al. 1998)

In den darauffolgenden Jahren nahm die Erforschung der möglichen Folgen von Ozeanversauerung weiter an Fahrt auf. Eine große Vielfalt an Bakterio-, Phyto- und Zooplanktern wurde untersucht, und es bestätigte sich, dass Stoffwechselprozesse und Überlebensraten dieser Organismen unterschiedlich stark von Ozeanversauerung betroffen sein können. Zunächst wurden die Ergebnisse fast ausschließlich unter Laborbedingungen erzielt, bei denen einzelne Organismen

aus ihrer natürlichen Umgebung entnommen und in vitro, also in spezifisch gestalteten Laboraquarien, eingehend untersucht wurden. Durch diese Experimente lernte man viel über den Einfluss von Ozeanversauerung auf die Physiologie der Organismen. Man begann zu verstehen, welche Stoffwechselprozesse im besonderen Maße betroffen sein könnten. Was Laborexperimente jedoch nicht aufklären können, ist die Frage wie sich Reaktionen der Organismenebene auf Artengemeinschaften und ganze Ökosysteme auswirken. Hierfür bedarf es Studien an natürlichen Lebensgemeinschaften, in denen physiologische Reaktionen einzelner Organismen in einem ökologischen Umfeld mit all seinen Wechselwirkungen und trophischen Interaktionen zum Tragen kommen. Im Weiteren werden wir näher auf diese neueren Feldstudien eingehen, in denen der Einfluss von Ozeanversauerung auf komplette pelagische Lebensgemeinschaften untersucht wurde.

Meeresströmungen sowie wind- und wellengetriebene Durchmischung der Wassermassen sorgen dafür, dass der pelagische Lebensraum ständig in Bewegung ist. Jede Vermessung einer Planktongemeinschaft im offenen Meer ist daher eine Momentaufnahme. Wiederholt man die Messung am selben Ort einen Tag oder eine Woche später, beprobt man nicht den selben Wasserkörper und somit auch nicht dieselbe Planktongemeinschaft. Um Ozeanversauerung in pelagischen Ökosystemen zu simulieren und dessen Auswirkungen im zeitlichen Verlauf zu untersuchen, ist es deshalb erforderlich, einen Wasserkörper in einem ausreichend großen Gefäß einzuschließen. Behältnisse mit denen solche Wassereinschlüsse im Freiwasser gemacht werden können, nennt man »pelagische Mesokosmen« (Abb. 4.6-1).



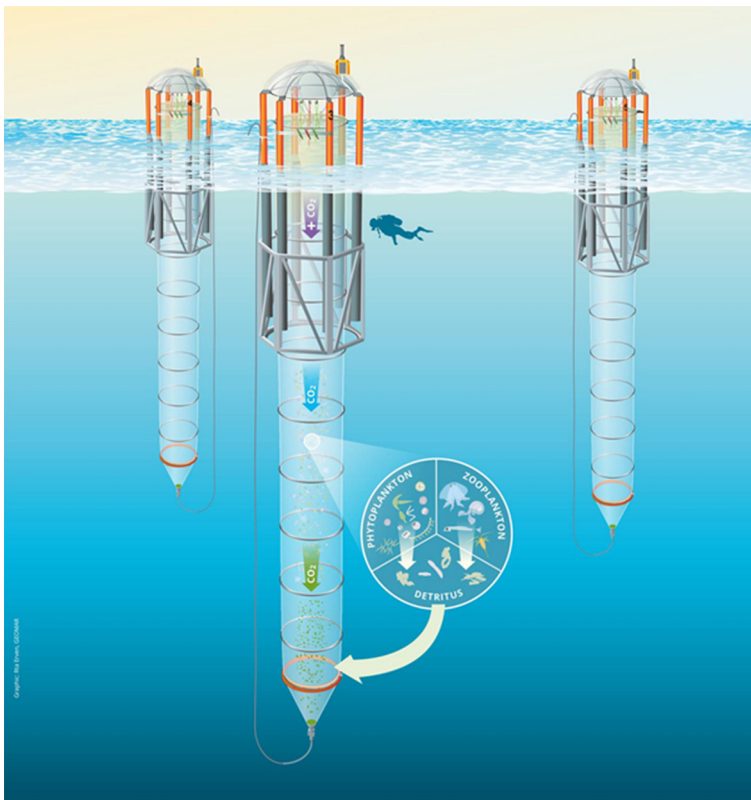
**Abb. 4.6-1:** Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Coccolithophoridenart *Emiliana huxleyi* (B) und der Foraminiferenart *Globigerinoides ruber*. *E. huxleyi* gehört zum Phytoplankton und lebt somit an der Meeresoberfläche, wo genug Licht für Photosynthese vorhanden ist. Wenn die Kalkalge die für sie typischen Blüten bildet, kann man dies sogar durch eine milchige Färbung des Meerwassers vom Weltall aus sehen kann. *G. ruber* gehört zum Zooplankton und lebt an der Oberfläche, wo es anderes Zooplankton frisst. Coccolithophoriden und Foraminiferen sind die produktivsten Kalkbildner unseres Planeten. Ihre kalkigen Überbleibsel, die über lange Zeit auf den Meeresgrund gesunken und dort akkumuliert sind, finden wir heute in Form von mächtigen Kalkformationen wieder. Dazu gehören zum Beispiel die Kreidefelsen der englischen Südküste in Dover. Elektronenmikroskopische Aufnahmen wurden am Institut für Geowissenschaften der Universität Kiel angefertigt (Fotos: L. T. Bach, M. Regenberg & K. Nachtigall).

Ergebnisse aus Mesokosmenstudien zu interpretieren, ist sehr anspruchsvoll, da eine Vielzahl von trophischen Interaktionen zwischen verschiedenen Planktonorganismen und den für sie relevanten Umweltbedingungen zu berücksichtigen sind. Aufgrund dieser komplexen Wechselbeziehungen und weil das pelagische Nahrungsnetz örtlich und zeitlich stark variieren kann, können die Ergebnisse solcher Studien sehr unterschiedlich ausfallen. Trotz dieser schwierigen Rahmenbedingungen fanden Wissenschaftler einige bemerkenswert konsistente Reaktionen der Planktongemeinschaften auf Ozeanversauerung. Die wohl bedeutendste Erkenntnis war das Erstarken der aller kleinsten Phytoplankter unter erhöhten  $\text{CO}_2$  Werten. Unter sehr unterschiedlichen ozeanografischen und klimatischen Bedingungen vermehrten sich diese Gruppe von 0,2-2  $\mu\text{m}$  (1  $\mu\text{m}$  = 1 tausendstel Millimeter) kleinen Zellen deutlich besser unter simulierten Ozeanversauerungsbedingungen als in den Kontrollmesokosmen (BRUSSAARD et al. 2013).

Trotz ihren geringen Größen hat diese Organismengruppe eine enorme Bedeutung für das marine Nahrungsnetz. Besonders in subtropischen und nährstoffarmen Gebieten haben sie einen hohen Anteil an der Gesamtphotosyntheseleistung einer Phytoplanktongemeinschaft, weil sie aufgrund ihres geringen großen

Oberflächen- zu Volumenverhältnisses besonders effektiv die limitierenden Nährstoffe aufnehmen können. Wenn in Zukunft ein größerer Anteil der Photosyntheseleistung von diesen Kleinsten der Kleinen getragen wird, dann könnten das Auswirkungen auf das gesamte Nahrungsnetz haben. Verschiebt sich die mittels Photosynthese gewonnene und in organischen Kohlenstoffverbindungen gebundene Energie in Richtung kleinerer Phytoplankter, bedeutet dies in der Regel, dass eine weitere Ebene in der Nahrungspyramide erforderlich ist, um die durch Photosynthese erzeugte Nahrung für höhere trophische Ebenen nutzbar zu machen. Da von einer trophischen Ebene zur nächsten nur etwa 10% der Energie weitergereicht und ca. 90% veratmet und als  $\text{CO}_2$  ausgeschieden werden, bedeutet eine zusätzlichen Ebene, das neun Zehntel der primär gespeicherten Energie bereits an der Basis der Nahrungskette wieder verloren gehen. Durch die beobachtete Verschiebung in der Zusammensetzung der Planktongemeinschaft kann es daher dazu kommen, dass letztlich weniger Nahrung für Fische und Wale zur Verfügung steht. Eine Verringerung der Fischproduktion durch Ozeanversauerung wäre in diesem Szenario eine mögliche Folge.

Jedoch ist auch der umgekehrte Fall denkbar. In vielen Experimenten beobachtete man neben der höheren Anzahl von kleinstem Phytoplankton auch eine



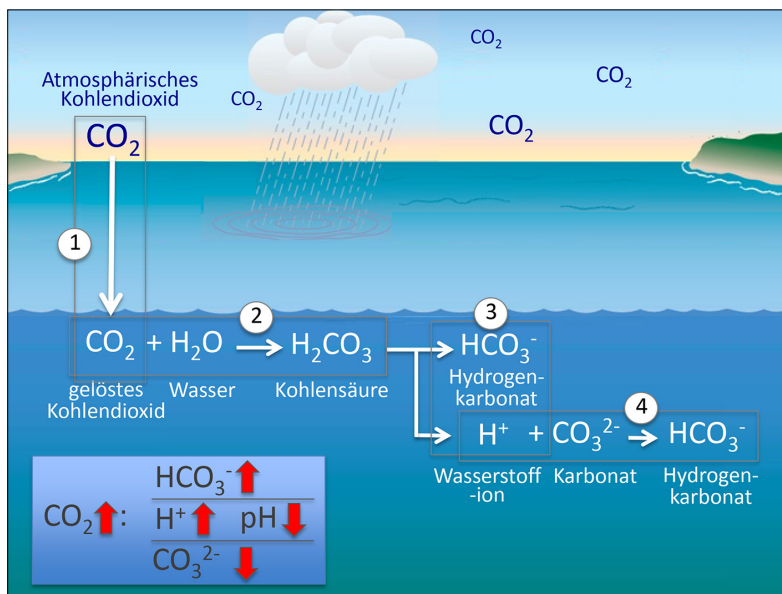
**Abb. 4.6-2:** Schematische Darstellung der pelagischen Mesokosmenanlage KOSMOS (Kiel Off-Shore Mesocosms for Ocean Simulations), die am GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung Kiel entwickelt wurden (RIEBESELL et al. 2013). Ein 8 m langes Schwimmgestell trägt einen 25 m langen zylindrischen Sack aus lichtdurchlässiger Kunststoffolie. In diesem Sack werden ca. 50 m<sup>3</sup> Meerwasser inklusive der darin natürlich vorkommenden Planktongemeinschaft eingeschlossen. In einem Experiment kommen bis zu zehn solcher Säcke zum Einsatz, welche dem experimentellen Design entsprechend unterschiedlich manipuliert werden können. Für Experimente zur Ozeanversauerung wird das Karbonatsystem des eingeschlossenen Wassers durch Zugabe von  $\text{CO}_2$ -gesättigtem Seewasser so eingestellt, dass es die für die Zukunft prognostizierten  $\text{CO}_2$ -Werte annimmt. Der Vergleich mit nicht manipulierten Kontrollmesokosmen lässt Rückschlüsse über den Einfluss von Ozeanversauerung auf die Planktongemeinschaft zu.

Zunahme der Gesamtphotosyntheseleistung innerhalb der Planktongemeinschaft. Dieses Ergebnis war nicht überraschend, denn  $\text{CO}_2$  ist essentieller Grundbaustein für die Photosynthese und es ist schon länger bekannt, dass erhöhte  $\text{CO}_2$  Konzentrationen das Pflanzenwachstum zu einem gewissen Grad stimulieren können. Ein höheres Angebot an pflanzlicher Nahrung könnte eine höhere Anzahl von Konsumenten versorgen. Ein solches Szenario hätte eine Erhöhung der Fischproduktion durch Ozeanversauerung zur Folge.

Ozeanversauerung kann aber nicht nur Folgen für pelagische Nahrungsnetze haben. Erhebliche Konsequenzen ergeben sich auch für die marinen Stoffkreisläufe wie den Kohlenstoffkreislauf. Ein besonders interessantes Ergebnis in diesem Zusammenhang wurde in einer kürzlich veröffentlichten Mesokosmenstudie präsentiert, in der wieder einmal die kalkbildenden Coccolithophoriden im Fokus standen (Abb. 4.6-1). Hier zeigte sich, dass leicht verringerte Wachstumsraten der Kalkalge *Emiliania huxleyi* unter simulierten Versauerungsbedingungen zu einem erheblichen Einbruch

ihrer Populationsdichte führten. *E. huxleyi* war unter erhöhten  $\text{CO}_2$ -Werten nicht mehr in der Lage, die für diese Art übliche Massenentwicklung – auch als Blüte bezeichnet – durchzuführen. Diese Studie machte deutlich, dass die minimal negative Auswirkung von Ozeanversauerung auf die Wachstumsrate, die schon Jahre zuvor unter Laborbedingungen beobachtet wurde, für diesen Organismus drastische Auswirkungen in seiner natürlichen Umgebung haben kann (RIEBESSELL et al. in Druck)..

Eine ausbleibende Blüte von *E. huxleyi* unter Ozeanversauerung hätte weitreichende Folgen für die Stoffkreisläufe. Da der von den Coccolithophoriden gebildete Kalk das Absinken von organischem Material beschleunigt, ein Phänomen welches als Ballasteffekt bezeichnet wird, spielt diese Gruppe eine wichtige Rolle im Tiefentransport von Kohlenstoff. Durch das Absinken organischen Kohlenstoffs in die Tiefe werden große Mengen an Kohlenstoff vom Oberflächenwasser in die Tiefsee gepumpt, wo es über Jahrhunderte von der Atmosphäre abgeschottet bleibt. Man hat ausge-



**BOX 1:** Die Chemie der Ozeanversauerung: Durch die Verbrennung fossiler Energieträger und andere menschliche Einflüsse steigt die  $\text{CO}_2$  Konzentration in der Atmosphäre momentan steil an. Ca 30% dieses  $\text{CO}_2$  bleibt jedoch nicht in der Atmosphäre, sondern wird von den Meeren absorbiert. Hier reagiert  $\text{CO}_2$  mit Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) und bildet eine schwache Säure – die Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Der Großteil der Kohlensäure zerfällt sofort in Hydrogenkarbonationen ( $\text{HCO}_3^-$ ) und Protonen ( $\text{H}^+$ ). Ein Teil der Protonen wird daraufhin direkt wieder von Karbonationen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) gepuffert. Dadurch verringert sich zwar die Konzentration von  $\text{CO}_3^{2-}$  (es entsteht noch mehr  $\text{HCO}_3^-$ ), aber die Zunahme von  $\text{H}^+$  bzw. die gleichbedeutende Abnahme des pH-Wertes wird abgemildert (pH ist der negative dekadische logarithmus der  $\text{H}^+$  Konzentration;  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ ; ZEEBE & WOLF-GLADROW 2001). Seit Beginn der Industrialisierung hat sich der pH-Wert im Ozean bereits von ca. 8,2 auf 8,1 verringert. Dieser Trend wird sich abhängig von den  $\text{CO}_2$  Emissionen fortsetzen. Man geht davon aus, dass am Ende dieses Jahrhunderts Werte zwischen 7,9 und 7,7 erreicht werden. Diese scheinbar moderate Abnahme des pH-Wertes bedeutet eine Verdopplung bis Verdreifachung der  $\text{H}^+$  Konzentration in einem Zeitraum (100 Jahre), in dem eine solch drastische Erhöhung seit Millionen von Jahren nicht vorgekommen ist. Unter diesem Eindruck hat sich der »Ozeanversauerung« etabliert, obwohl man festhalten muss, dass der Ozean auch in Zukunft nach chemischer Definition »alkalisch« bleiben wird ( $\text{pH} > 7$ ).



rechnet, dass die atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration ohne diese »biologische Pumpe« ca. doppelt so hoch wäre wie heute (MAIER-REIMER et al. 1996). Ohne Blütenentwicklung von *E. huxleyi* kam der Ballasteffekt in den Mesokosmen mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nicht zum Tragen mit der Folge, dass der Tiefentransport von organischem Kohlenstoff unter Ozeanversauerung abgeschwächt wurde. Übertragen auf zukünftige CO<sub>2</sub>-Entwicklungen im Ozean würde man einen verminderten Transport von Kohlenstoff in den tiefen Ozean prognostizieren. Weniger Kohlenstoffaufnahme im tiefen Ozean bedeutet, dass mehr CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre verbleibt und die globale Erwärmung zusätzlich antreibt.

Eine weitere Folge der ausbleibenden *E. huxleyi*-Blüte in diesem Experiment waren stark verminderte Emissionen von Dimethylsulfid (DMS), einem klimawirksamen Gas, an dessen Produktion *E. huxleyi* maßgeblich beteiligt ist. DMS ist deshalb so interessant, weil es Grundlage von sogenannten Kondensationskeimen sein kann, die bei der Entstehung von Wolken eine wichtige Rolle spielen. Wenn nun die Emission dieses Gases durch Ozeanversauerung sinken sollte, dann könnte sich das negativ auf die Wolkenbildung auswirken. Dies gilt insbesondere in Regionen, in denen es an anderen Kondensationskeimen wie z.B. Staubpartikeln, in der Atmosphäre mangelt, also vornehmlich über den Ozeanen fernab von großen Landmassen. Momentan ist allerdings nicht geklärt, ob eine Veränderung in der Wolkenbildung zur Erwärmung oder Abkühlung des Klimas führt. Nach wie vor sind klimarelevante Rückkopplungen, die im Zusammenhang mit Wolkenbildung stehen, einer der größten Unsicherheitsfaktoren in globalen Klimamodellen.

Die oben genannten Beispiele aus Ozeanversauerungsexperimenten der letzten Jahre verdeutlichen, wie scheinbar kleine Veränderungen in Planktonlebensgemeinschaften weitreichende Auswirkungen auf die Umwelt haben könnten. Allerdings verdeutlichen sie mindestens ebenso eindrücklich, wie schwer es sein wird, die Folgen solcher Veränderungen vorherzusagen. Eine klare Aussage darüber zu treffen, was unsere

Ergebnisse im weiteren Sinne für die Menschheit bedeuten, ist nur sehr selten und zumeist nur unter zur Hilfenahme ungeprüfter Annahmen möglich. Um diese von der Gesellschaft geforderten Prognosen abliefern zu können, benötigen wir ein weitaus umfassenderes Verständnis des System Erde, als wir momentan haben. Deshalb ist es von großer Wichtigkeit, die naturwissenschaftliche Forschung nicht allein auf die Untersuchung akuter Probleme zu fokussieren, sondern auch darauf, ein Grundverständnis der wichtigen biogeochemischen Vorgänge zu generieren. Womöglich die entscheidende Erkenntnis nach vielen Jahren Ozeanversauerungsforschung ist, dass wir ohne mechanistisches Verständnis der wichtigen Prozesse im Erdsystem auch in Zukunft kaum in der Lage sein werden, die Konsequenzen der Ozeanversauerung verlässlich abzuschätzen.

## REFERENZEN

- BRUSSAARD, C. P. D., A. A. M. NOORDELOOS, H. WITTE, M. C. J. COLLENTEUR et al. (2013): Arctic microbial community dynamics influenced by elevated CO<sub>2</sub> levels. *Biogeosciences*. 10: 719-731. doi:10.5194/bg-10-719-2013.
- GATTUSO, J., M. FRANKIGNOULLE, I. BOURGE & S. ROMAINE (1998): Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Glob Planet Change*. 18:37-46. doi:10.1016/S0921-8181(98)00035-6.
- MAIER-REIMER, E., U. MIKOLAJEWICZ & A. WINGUTH (1996): Future ocean uptake of CO<sub>2</sub>: interaction between ocean circulation and biology. *Clim Dyn*. 12: 711-722. doi:10.1007/s003820050138.
- RIEBESELL, U., J. CZERNY, K. VON BRÖCKEL, T. BOXHAMMER et al. (2013): Technical Note: A mobile sea-going mesocosm system – new opportunities for ocean change research. *Biogeosciences*. 10: 1835-1847. doi:10.5194/bg-10-1835-2013.
- RIEBESELL, U., I. ZONDERVAN, B. ROST, P. D. TORTELL et al. (2000): Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*. 407: 364-367.
- RIEBESELL, U., L. T. BACH, R. G. J. BELLERBY, J. R. BERMUDEZ et al. (in Druck): Ocean acidification impairs competitive fitness of a predominant pelagic calcifier.
- ZEEBE, R. E. & D. A. WOLF-GLADROW (2001): CO<sub>2</sub> in seawater: Equilibrium, kinetics, isotopes. Elsevier Oceanography Series. Amsterdam: Elsevier, 2001.

## Kontakt:

Dr. Lennart T. Bach  
 Prof. Dr. Ulf Riebesell  
 GEOMAR Helmholtz-Zentrum für Ozeanforschung, Kiel  
 lbach@geomar.de  
 uriebesell@geomar.de

Bach, L. T. & U. Riebesell (2016): Neue Erkenntnisse über die Auswirkungen der Ozeanversauerung auf marine Lebensgemeinschaften. In: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, R. Müller & E. Rachor (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Die Biodiversität*. pp. 249-253. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.die-biodiversitaet.40.